



## TÓPICO 1 – (Patologías de las construcciones)

### **Estudio del pavimento de hormigón de la autopista Córdoba-Carlos Paz, Provincia de Córdoba, Argentina: Patologías vinculadas a su deterioro.**

Poklepovic Fernanda<sup>1,a</sup>, Locati Francisco<sup>2,b</sup>, Silva Raúl<sup>1,c</sup>, Marfil Silvina<sup>3,d</sup>, Maiza Pedro<sup>4,e</sup>

<sup>1</sup>Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba, Dpto. I, Tecnología y Laboratorio. Los Pozos 2850, B° La France (5000), Córdoba, Argentina.

<sup>2</sup>CICTERRA – CONICET – UNC. Av. Vélez Sarsfield 1611 (X5016GCA), Córdoba, Argentina.

<sup>3</sup>Dpto. de Geología – UNS-INGEOSUR/Inv. CIC. San Juan 670 (8000), Ba. Bca., Argentina.

<sup>4</sup>Dpto. de Geología – UNS-INGEOSUR/Investigador CONICET.

<sup>a</sup>fpoklepovic@com.uncor.edu, <sup>b</sup>flocati@efn.uncor.edu, <sup>c</sup>raulsilva@argentina.com, <sup>d</sup>smarfil@uns.edu.ar, <sup>e</sup>pmaiza@uns.edu.ar

**Palabras-clave:** ettringita, RAS, cuarzo tensionado, DRX, SEM-EDS

### **Resumen**

El pavimento de hormigón de la Ruta Nacional N °20 (autopista Córdoba - Carlos Paz) presenta deterioros generalizados. Trabajos previos indican que el deterioro observado es consecuencia del desarrollo de la reacción álcali-sílice (RAS).

En ciertos tramos, la problemática de la macrotextura del pavimento de hormigón asociada a la falta de adherencia neumático-pavimento llevó a ejecutar un texturado y recubrimiento con mezclas asfálticas delgadas, mejorando las condiciones de servicialidad de la vía. En la actualidad algunos sectores del pavimento flexible reflejan la ubicación de juntas transversales, rotura de esquinas, áreas de bacheo y otras reparaciones así como el avance de los procesos que deterioran las placas de hormigón subyacentes.

El objetivo de este trabajo es estudiar la evolución de la RAS, vincular este proceso a otras patologías asociadas y a deterioros de origen constructivo. También se estudió el comportamiento de los materiales utilizados como agregados (gruesos y finos) para concluir cual fue el factor desencadenante del deterioro y cuales fueron las especies mineralógicas responsables.

Los minerales de neoformación se caracterizaron mediante lupa binocular, microscopía de polarización, difractometría de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido con espectrómetro de energía dispersiva (SEM-EDS).

Las causas del deterioro están relacionadas principalmente con la rotura y el fisuramiento asociado a problemas de humedad en la estructura. Es probable que el desarrollo de minerales de neoformación asociados a la RAS y la formación de ettringita secundaria, se hayan producido como consecuencia



del deterioro físico inicial que provocó el aumento de la humedad interna del hormigón. Los agregados metamórficos ricos en cuarzo que presentan desarrollo de microestructuras de deformación, jugaron un papel determinante en el desarrollo de expansiones lentas/diferidas posteriores y contribuyeron al fisuramiento de la estructura.

## Introducción

La autopista Córdoba - Villa Carlos Paz (Ruta Nacional N° 20) en el inicio de su recorrido une ambas ciudades (Fig. 1), para internarse luego en las provincias de San Luis y San Juan donde finaliza su recorrido.

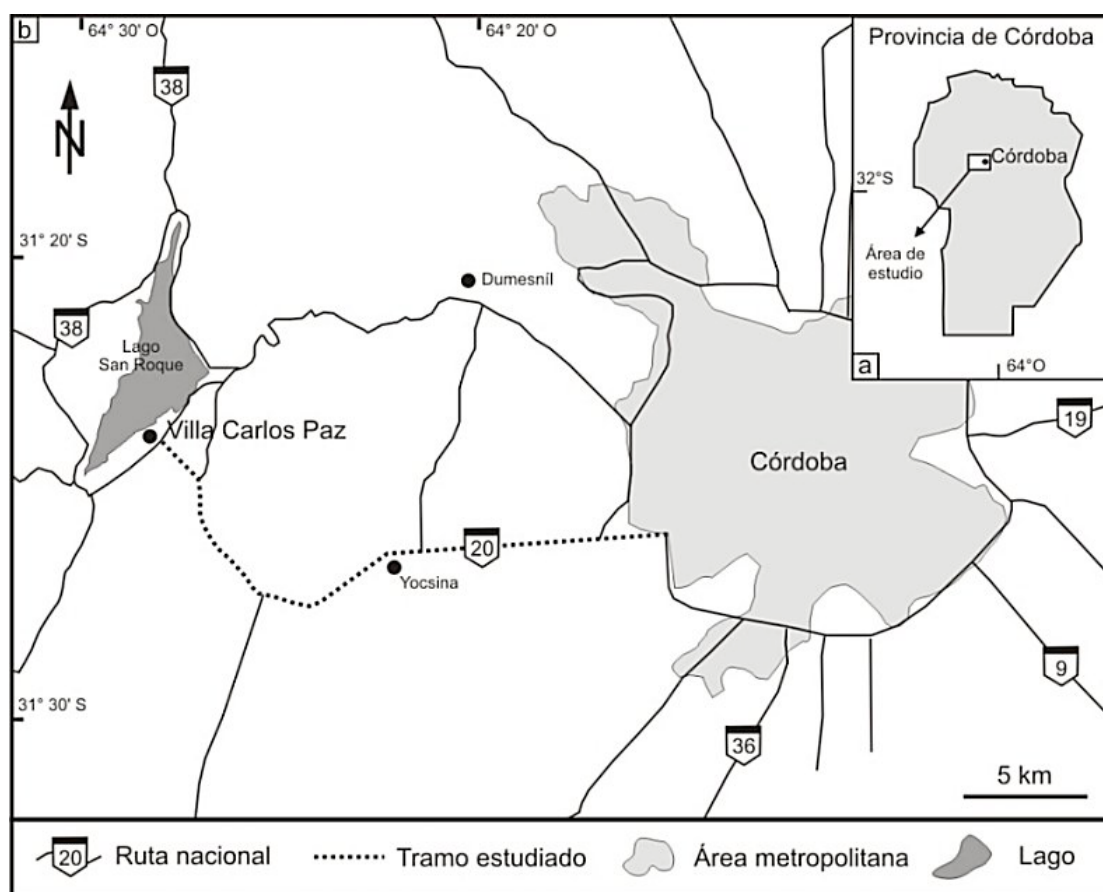


Figura 1: Ubicación del área estudiada. a) Ubicación del área de estudio en la Provincia de Córdoba. b) Ubicación del tramo estudiado (línea de puntos).

Inicialmente en la provincia de Córdoba la Ruta Nacional N° 20 tenía su continuidad a través del camino Tanti - Taminga, actual Ruta Provincial N° 28; con posterioridad lo hizo mediante el denominado camino de Las Altas Cumbres hoy Ruta Provincial N° 34 y en la actualidad la Ruta Nacional N° 20 continúa dentro de la provincia de Córdoba desde Villa Dolores hacia el límite con San Luis.

Esta obra constituye una de las principales infraestructuras viales en la provincia de Córdoba que permite la rápida accesibilidad hacia un importante



centro turístico de carácter nacional. La fecha de ejecución de la obra se remonta a la década de 1970.

El camino consta de una obra básica que por sectores se materializan con terraplenes y pedraplenes de alturas variables y desmontes con cortes en roca. El diseño estructural de la autopista está conformado por una base granular con triturado 0-20mm cementada al 7%, cuyas dimensiones son de 8,10m de ancho y 0,12m de espesor, la mezcla fue elaborada en planta fija y colocada con distribuidora mecánica de una sola pasada.

Las calzadas de hormigón son de 0,20m de espesor, 7,50m de ancho cada una y una longitud de losa de 9,95m entre juntas transversales. Los bordes internos de cada calzada están separados 22m. Las losas contienen una malla de acero en la mitad de su espesor a los fines del control de fisuración, con pasadores y barras de unión en las juntas transversales y longitudinales respectivamente. El diseño se completa con las banquetas pavimentadas con mezcla asfáltica de 0,50m de ancho en la banquina interna y 2,50m en la banquina externa. La ejecución de las losas de hormigón se llevaron a cabo con una hormigonera ambulo-operante sobre los laterales de las calzadas, dosándose los agregados con camiones volcadores particionados para cada tipo, incorporándose el agua y el cemento en la hormigonera, distribuyéndose el hormigón a través de cinta transportadora con un asentamiento que variaba entre 6 y 9cm. Se utilizó una regla vibrante y terminación manual, el curado se realizó mediante el empleo de láminas de polietileno colocadas sobre la superficie; las juntas tanto transversales como longitudinales fueron aserradas.

La procedencia de los materiales utilizados en la ejecución de la obra era en su mayoría de origen local, el cemento, los agregados gruesos y la arena de trituración de la planta y cantera de Corcemar; la arena silíceo de la zona de Río Segundo y un filler silíceo que actuaba como corrector de la granulometría correspondiente a un médano de Río IV sólo empleado en la zona inicial Córdoba - Malagueño.

Desde la estación de peaje y en dirección hacia Carlos Paz se ejecuto en el año 2000 un texturado de las losas de hormigón y la colocación de una capa de mezcla asfáltica y tratamiento superficial delgado de origen asfáltico en la calzada con tránsito hacia Carlos Paz en (5 km) y en 7 km en la calzada hacia Córdoba en el mismo sector, en ambos casos con el objeto de mejorar la adherencia calzada-neumático. A continuación y en dirección hacia la ciudad de Villa Carlos Paz las losas de hormigón están expuestas hasta el distribuidor de la variante Costa Azul.

El siguiente tramo hasta el empalme con la avenida San Martín en Villa Carlos Paz y en la mano hacia esa ciudad fue cubierta por mezcla asfáltica de 5cm de espesor con el objeto de corregir diferentes irregularidades que la misma presentaba como falta de lisura, escalonamientos, rugosidad, entre otras. En el mismo tramo la calzada con dirección a Córdoba fue texturada y cubierta con un tratamiento superficial delgado de origen asfáltico

Estudios anteriores sobre esta misma autopista [1,2] determinaron que el deterioro de las placas de hormigón se produjo por el desarrollo de la reacción álcali-sílice entre los agregados finos y gruesos utilizados y los álcalis de la solución de poro del hormigón. Como evidencia de esto se determinó la



presencia de un silicato de calcio con cantidades menores de aluminio y potasio definido como un material similar a una ceolita (clinoptilolita) presente en la pasta y rellenando cavidades. Cristalizado sobre el material ceolítico se identificó un sulfoaluminato de calcio posiblemente ettringita ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ) que crece de forma acicular hacia el interior de las cavidades.

Una de las evidencias que lleva a diagnosticar la presencia de la RAS en una estructura de hormigón, es la determinación de sus productos de neoformación en grietas, rellenando cavidades, en el interior de los agregados y/o en la interfase pasta-agregado. Estos productos han sido estudiados en numerosas obras de ingeniería como también en probetas de laboratorio durante ensayos acelerados mostrando una gran variabilidad morfológica y composicional (ej.: [3-6]). Sin embargo en la mayoría de los casos estudiados los principales elementos detectados mediante EDS fueron Si, Ca, Na, K y cantidades menores de Al, Fe, Mg y S.

Si bien históricamente se definió al producto de la reacción como el “Gel de RAS”, en realidad pueden encontrarse silicatos que comprenden estructuras amorfas o levemente cristalinas hasta variedades muy cristalinas. Los estudios de SEM-EDS junto a la determinación de las especies minerales mediante DRX han contribuido en gran medida, a su caracterización y al estudio de los factores vinculados con esas variaciones de composición y morfología.

En el presente trabajo se estudian las causas del deterioro de la Ruta Nacional N° 20, profundizando en los productos de neoformación relacionados con la RAS así como de otros asociados y se evalúa el rol de los agregados pétreos utilizados, en el desarrollo de la reacción.

## **Materiales y métodos**

Se realizó una inspección ocular a lo largo de la autopista a fin de detectar evidencias de deterioro recolectándose muestras del pavimento de hormigón correspondientes a losas reemplazadas o reparadas. Las observaciones texturales se efectuaron mediante lupa binocular y sobre secciones delgadas mediante microscopía óptica de polarización, se caracterizaron los productos de neoformación mediante un difractómetro Rigaku, D-Max III-C con radiación de Cu K $\alpha$  y monocromador de grafico con 35 Kv y 15 mA y un microscopio electrónico de barrido JEOL 35 CF con espectrómetro de energía dispersiva para el análisis químico cualitativo de microáreas desde boro a uranio. Las muestras analizadas por SEM-EDS se metalizaron con una película de carbono.

## **Resultados**

### *Inspección de la obra*

La inspección de la autopista se centralizó en aquellos tramos donde las losas de hormigón están expuestas al tránsito. En esos sectores se observan escalonamiento de losas, roturas en zonas próximas a juntas longitudinales y transversales con reparaciones de distintas características que involucran todo





el espesor del hormigón, parte del espesor con mezcla asfáltica, reemplazos de losas parciales y completas, losas con fisuración longitudinal y transversal, roturas de esquinas, losas con fisuración intensa en juntas transversales en la zona de pasadores (Fig. 2a), losas con fisuración intensa en mapa o craquelado (Fig. 2b y c) y losas con agregados gruesos expuestos por la pérdida del mortero superficial (Fig. 2d).

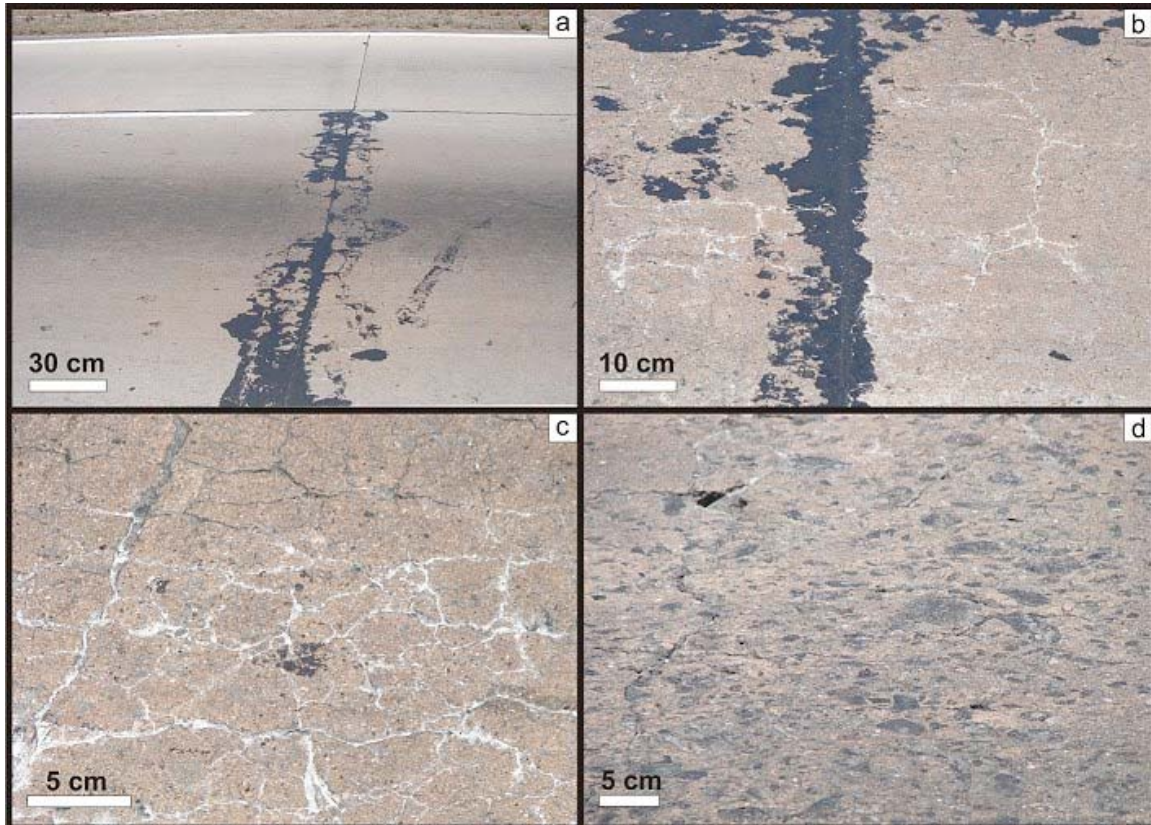


Figura 2: Fotografías de la autopista. a) Junta transversal con sellado asfáltico y fisuramiento asociado. b) Junta transversal sellada asociada a microfisuras con relleno blanquecino. c) Detalle de un área fisurada en forma de mapa en la que se observa el producto blanquecino. d) Zona fisurada con agregados gruesos expuestos y pulidos por la pérdida del mortero superficial.

En áreas con intensa fisuración como la zona media de losas y próximas a juntas transversales, se observa la presencia de un material blanquecino que rellena fisuras de aproximadamente 2 a 3 mm de apertura (Fig. 2b y c), en otros sectores se observa una variación en la coloración de las losas con una zona central blanquecina y los bordes amarillentos de brillo lustroso.

Las dimensiones de las placas es variable, alcanzando en la zona de mayor fisuración un diámetro circunscripto aproximado de 5cm, estos sectores están vinculadas a losas que presentan otros deterioros asociados.



### *Descripción del hormigón bajo lupa binocular*

A esta escala el hormigón se encuentra en buen estado. Sin embargo se observan algunas microfisuras en la pasta y el desarrollo de materiales blanquecinos en las paredes de las fisuras, en cercanías de los agregados y como relleno de cavidades de aire accidental.

Se puede diferenciar al menos dos tipos de rellenos en las cavidades de aire accidental, uno de aspecto masivo que precipita en las paredes formando capas alternadas de color blanco y transparente (Fig. 3a), y que en ocasiones colmatan completamente la cavidad (Fig. 3b).

El otro tipo de relleno corresponde a minerales prismáticos dispuestos en grupos radiales de hábito acicular de color blanco a transparente que la tapizan (Fig. 3c).

Algunos agregados presentan un borde más oscuro de aproximadamente 2 mm de espesor en el límite pasta-agregado (Fig. 3d).

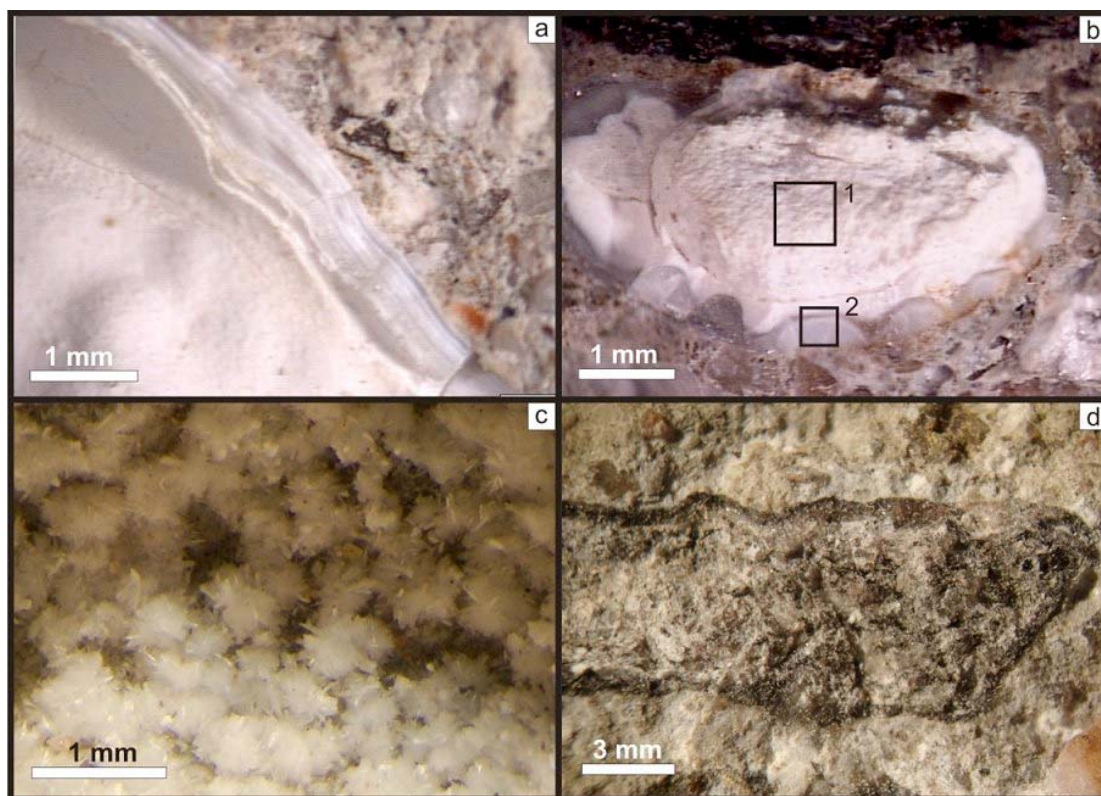


Figura 3: Fotografías bajo lupa binocular. a) Borde de una cavidad de aire accidental en la que se puede ver un material blanquecino y otro transparente dispuestos en capas alternadas. b) Cavidad de aire accidental completamente rellena en la que se diferencian dos materiales contrastados, uno en el centro de color blanco (1) y otro de color blanco a transparente en el borde (2). c) Cristales prismáticos dispuestos en grupos radiales de hábito acicular. d) Agregado gneísico que presenta un borde más oscuro en contacto con la pasta del mortero.





### *Descripción del hormigón bajo microscopio óptico*

Los agregados están constituidos principalmente por gneises biotíticos (Fig. 4a) y cantidades menores de anfibolitas, intrusivos graníticos y mármoles. Los primeros presentan una marcada foliación y se encuentran deformados.

El contenido de cuarzo es elevado (superando el 50%) y presenta abundantes microestructuras asociadas a deformación frágil (zonas de trituración por cataclasis) y frágil-dúctil (extinción ondulante, generación de bandas de deformación y subgranulado) (Fig. 4b). El tamaño de grano varía de pocos milímetros a algunas decenas de micras.

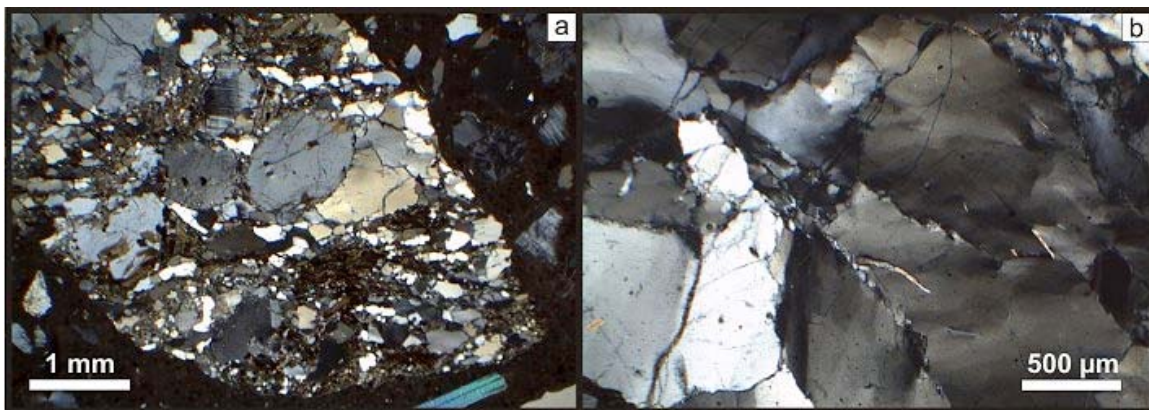


Figura 4: Fotomicrografías. a) Agregado gnéisico compuesto principalmente por cuarzo, plagioclasa y biotita. b) Detalle del sector rico en cuarzo con desarrollo de extinción ondulante, bandas de deformación y subgranulado incipiente. Nícoles cruzados.

En esta escala el hormigón presenta un deterioro importante. Se observan fisuras en la interfase pasta-agregado, en el mortero y que conectan los agregados con las cavidades de aire (Fig. 5a y b).

En la gran mayoría de las fisuras se observa la cristalización de un material fibroso perpendicular a las paredes de las fisuras que adquiere mayor tamaño y disposición radial en las cavidades.

Internamente el producto de neoformación dentro de las cavidades presenta fisuras tipo “grietas de desecación” posiblemente por la deshidratación y contracción del material de relleno (Fig. 5c y d).

Bajo el microscopio óptico no fue posible diferenciar los dos tipos de relleno de las cavidades ya que ambos muestran similares características ópticas.

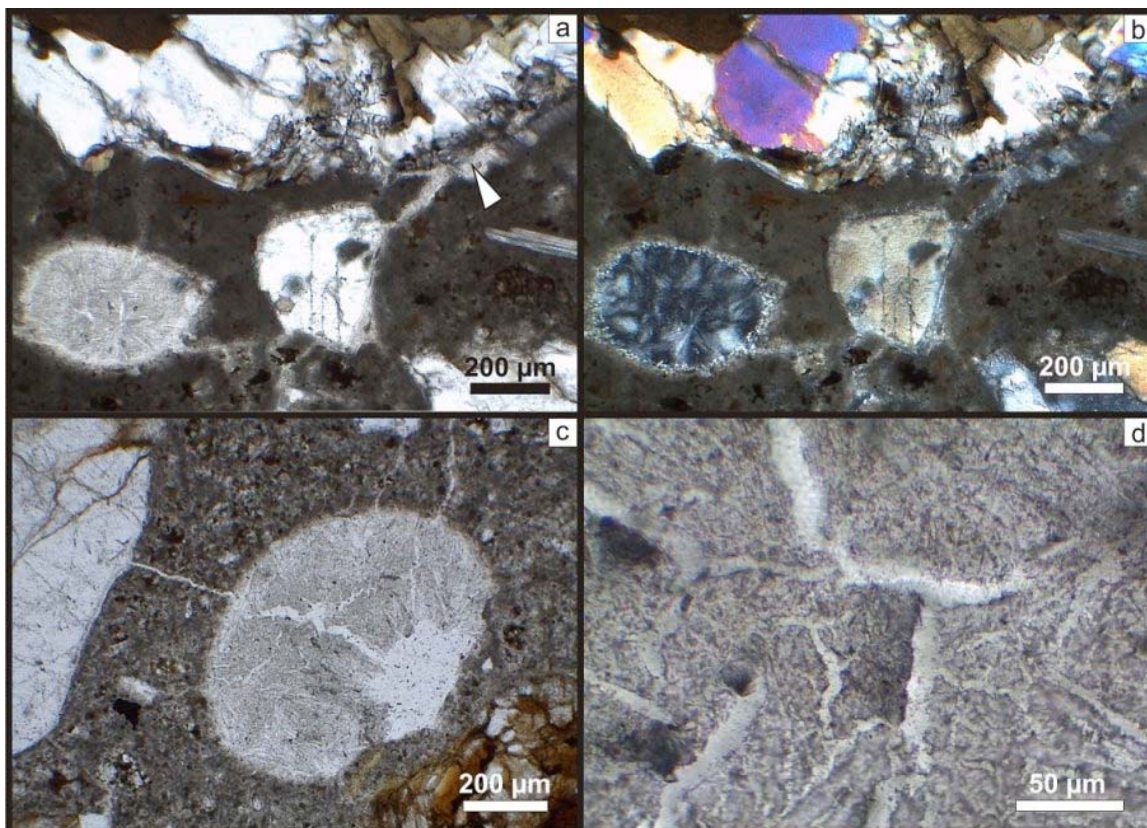


Figura 5: Fotomicrografías. a) Microfisura en la interfase pasta-agregado (flecha blanca) que avanza sobre el mortero y culmina en cavidad de aire accidental. Tanto la fisura como la cavidad presentan relleno. Nicoles paralelos. b) Misma imagen a nicoles cruzados. c) Cavidad de aire accidental rellena que se conecta con un agregado gnéisico a través de una fisura. d) Detalle del material de relleno en (c) donde se observan microfisuras posiblemente por contracción del material por deshidratación.

### DRX

Se separó el material que rellena las cavidades en forma de capas alternadas (Fig. 3b) a fin de determinar la especies minerales presentes.

El material de aspecto masivo, color blanco y de baja dureza de la parte central (Fig. 3d, sector 1), fue definido mediante DRX (Fig. 6a) como tobermorita ( $\text{Ca}_5\text{Si}_6(\text{O},\text{OH})_{18.5}\text{H}_2\text{O}$ ). También aparecen cantidades menores de calcita por carbonatación y cuarzo proveniente de los agregados.

La capa externa en contacto con el mortero (Fig. 3d, sector 2) está compuesta principalmente por calcita y cantidades menores de tobermorita y clintobermorita (Fig. 6b), aunque no se descarta la probable presencia de algún silicato de calcio hidratado.



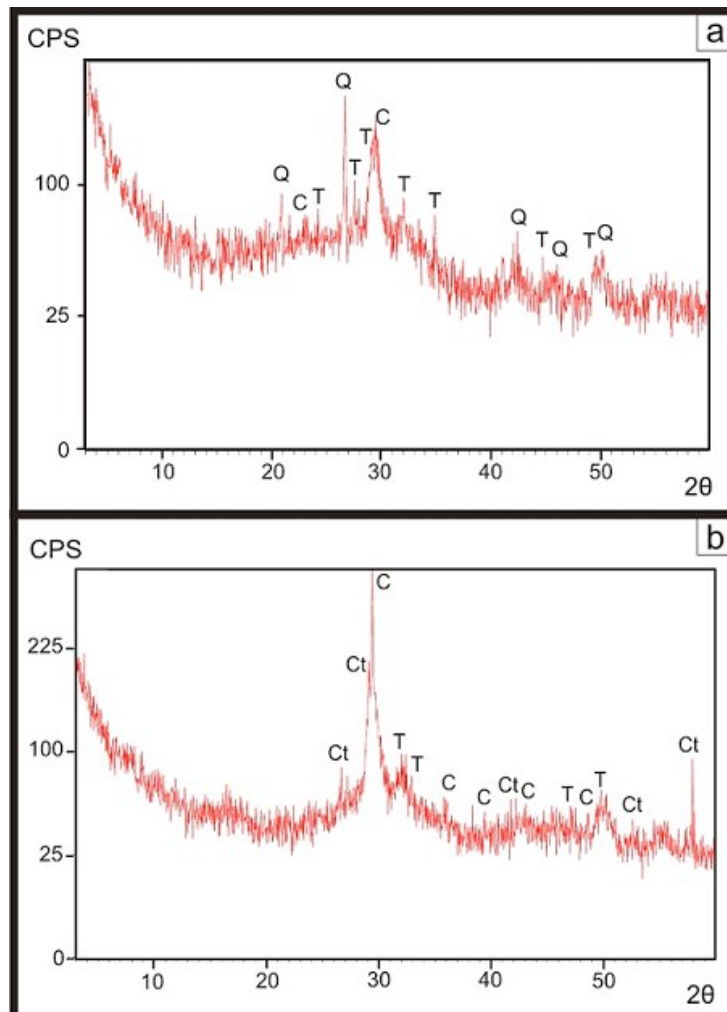


Figura 6: a) Diagrama de DRX del material central que rellena la cavidad de la Fig. 3d (sector 1). b) Diagrama de DRX del material de borde de la cavidad de la Fig. 3d (sector 2). C: calcita, T: tobermorita, Q: cuarzo, Ct: clinotobermorita.

### SEM-EDS

Se estudió la morfología de los productos de neoformación bajo SEM y se determinó la composición mediante EDS.

En general se encontraron tres materiales de neoformación. Una fase de hábito acicular y prismática, asociada con otra de aspecto laminar. Estas dos fases pueden aparecer dispuestas de forma desordenada (Fig. 7a), creciendo perpendicularmente a las fisuras (Fig. 8) o formando grupos radiales de hábito acicular que tapizan las burbujas de aire accidental de la Fig. 3c.

El análisis de EDS determinó la presencia de Ca, S, Si, Al, y O (Fig. 7b). Posteriormente se separó una porción del material que rellena cavidades (Fig. 3b) para su observación analizando cada fase por separado.

El material prismático de hábito acicular posee terminación plana de sección hexagonal (Fig. 9a) y el análisis de EDS reveló la presencia de Ca, S, Al y O (Fig. 9b). Esta fase corresponde a ettringita.



El material intercrecido con los cristales prismáticos de ettringita posee hábito laminar a fibroso (Fig. 10a) y el análisis de EDS determinó la presencia de Si, Ca, O y cantidades menores de S (Fig. 10b). Este material corresponde a la fase similar a la tobermorita definida mediante DRX. Por último se observó el material desarrollado en la interfase pasta-agregado. Corresponde a una fase de aspecto masivo a levemente fibroso (Fig. 11a). Los análisis de EDS revelan la presencia Si, Ca, O, Na, K y cantidades menores de Al (Fig. 11b).

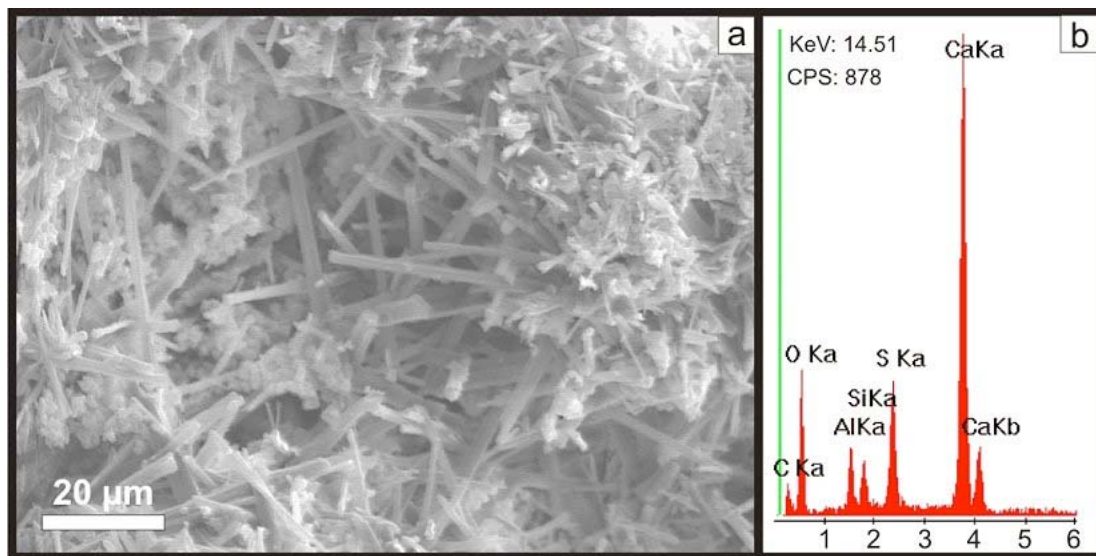


Figura 7: a) Imagen de SEM de una cavidad donde se desarrollan cristales prismáticos alargados y cristales de aspecto laminar. b) Análisis de EDS.

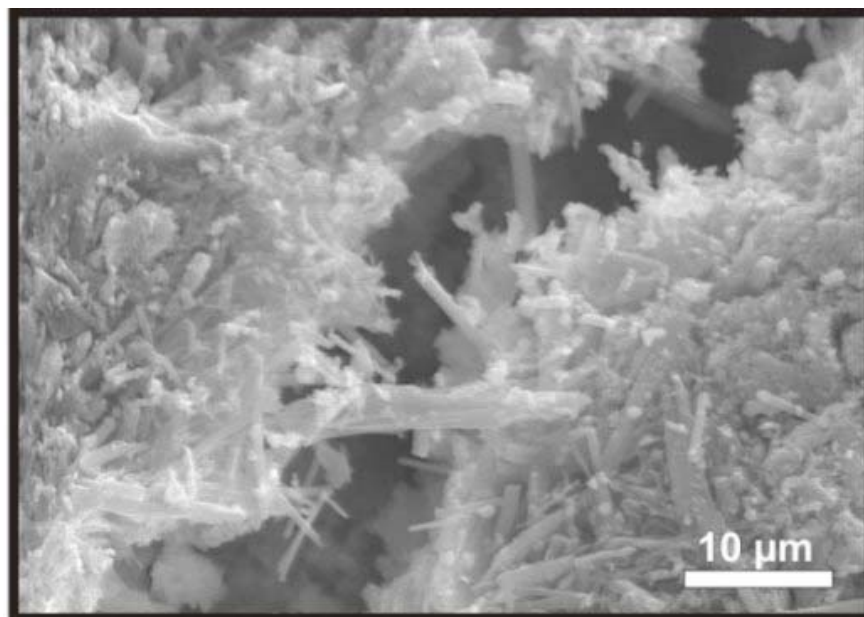


Figura 8: Imagen de SEM de una fisura en la que se desarrollan cristales aciculares de forma perpendicular a la misma.

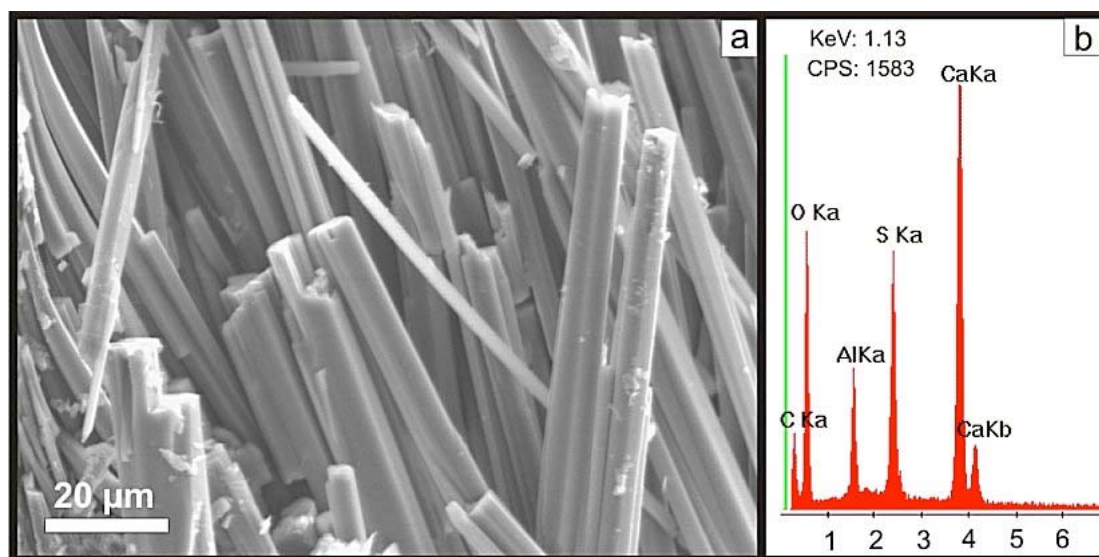


Figura 9: a) Imagen de SEM de cristales prismáticos de ettringita. b) Análisis de EDS.

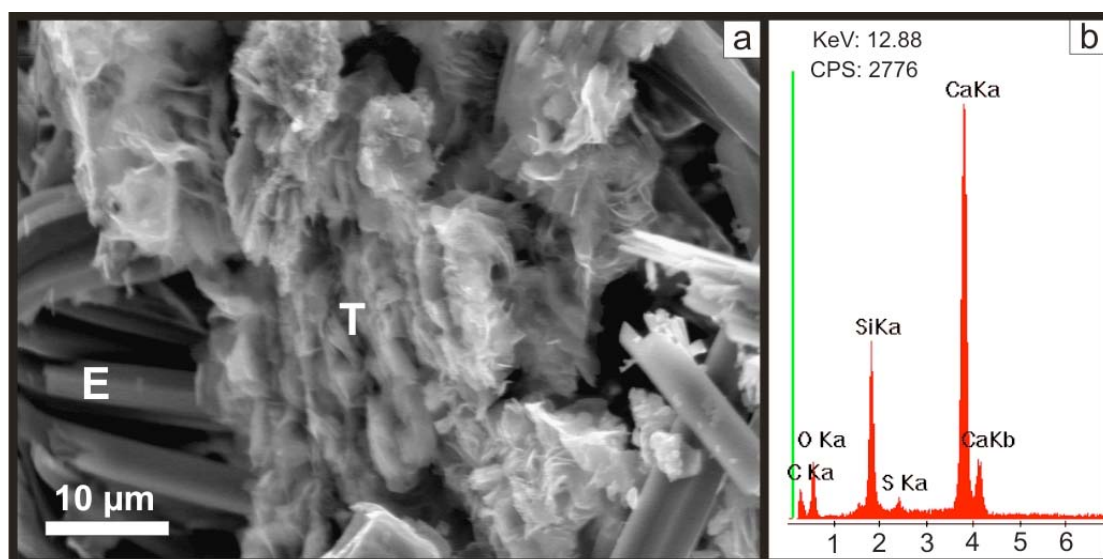


Figura 10: a) Imagen de SEM de la tobermorita (T) de hábito laminar a fibroso asociada a la ettringita (E). b) Análisis de EDS.



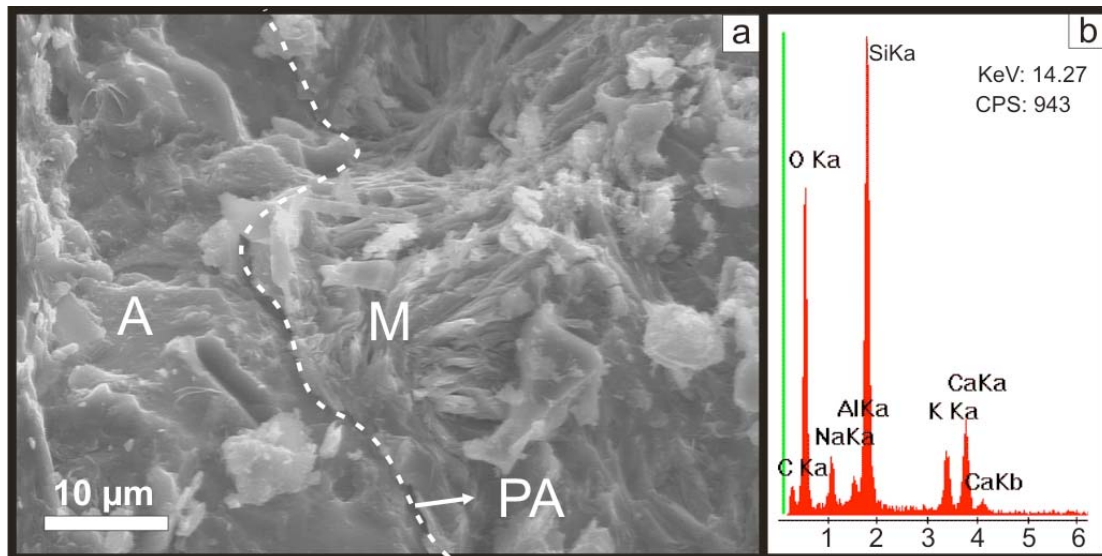


Figura 11: a) Imagen de SEM del material presente en la interfase pasta-agregado de hábito masivo a fibroso. b) Análisis de EDS. A: agregado, M: material de neoformación, PA: interfase pasta-agregado.

### Discusión

El deterioro observado en la autopista Córdoba-Villa Carlos Paz está vinculado a una suma de procesos que actuaron durante un largo período de tiempo. La mayoría de ellos están relacionados con el envejecimiento normal de un hormigón aunque existen otros que han actuado como aceleradores del proceso.

Es probable que la rotura se haya iniciado por fallas constructivas e incluso de proyecto, como podría ser el curado defectuoso. El ingreso de agua a través de las fisuras pudo ser el factor desencadenante para el desarrollo de la RAS similar a lo ocurrido en la ruta N° 127 [7].

El factor climático parece haber jugado un rol importante en este tramo de la Ruta Nacional N° 20. La elevada humedad y permeabilidad creciente de las losas ante la fisuración, roturas, juntas con conservación deficientes, y otros factores, contribuyó incrementando los procesos de deterioro.

Esta condición de humedad elevada alternada con períodos de sequía posiblemente haya contribuido en la movilización de iones a través de la solución de poro para que reaccionen con los agregados reactivos y con los materiales cementantes en el hormigón generando productos de neoformación en cavidades y fisuras.

La ettringita observada en cavidades de aire accidental y fisuras preexistentes está relacionada con el envejecimiento normal de un hormigón y se clasifica como ettringita secundaria según los criterios de Scrivener and Skalny [8]. Si bien parece no haber contribuido en los procesos de deterioro es probable que el porcentaje de la misma se haya incrementado por los problemas de humedad mencionados y por el desarrollo de la RAS.



Por otro lado no se cuenta con antecedentes específicos sobre el contenido de álcalis del cemento, su dosificación por metro cúbico y la composición de los agregados utilizados en la obra. Sin embargo los estudios petrográficos llevados a cabo en el hormigón de la autopista permitieron establecer que los agregados tienen un elevado contenido de rocas metamórficas (principalmente gneises y migmatitas). Esto, sumado a la presencia de microestructuras asociadas a deformación del cuarzo (extinción ondulante, bandas de deformación, subgranulado) han actuado como fuente de sílice para la generación de los silicatos de calcio que se han identificado en la interfase pasta-agregado, en fisuras y rellenando cavidades de aire accidental.

Esas fases de neoformación identificadas, presentan variabilidad composicional (cantidades variables de Si, Ca, Na, K, Al, S) y morfológica (laminares a fibrosos, masivos a fibrosos) lo cual está en concordancia con los antecedentes relacionados con el tema (ej.: [3-5])

Por otro lado, si bien existen antecedentes de estudios de DRX sobre los productos de neoformación en obras afectadas por la RAS [3-6,9-15], ninguno de esos materiales coincide con los picos observados en los diagramas de la fase similar a la tobermorita detectada mediante DRX en este estudio (aunque algunos de ellos también corresponden a silicatos de calcio hidratados).

La escasa cantidad de material que se ha separado bajo la lupa binocular no ha permitido hasta el momento caracterizar el material en su forma pura por lo que se necesitarán de mayores estudios para confirmar su presencia. Esto se hace evidente en la poca definición de los picos y en el ruido que presenta el fondo en los diagramas de DRX.

La fase presente en la interfase pasta-agregado no se caracterizó mediante DRX debido a la escasa cantidad de material, sin embargo no parece corresponder a la fase similar a la tobermorita ni a algún tipo de ceolita debido a la baja proporción de aluminio y calcio respecto de la de silicio.

Tanto los análisis de DRX como los de SEM-EDS reafirman la idea de que los productos de la RAS presentan una gran variación composicional y morfológica. Sin embargo esa variabilidad parece estar acotada a materiales similares a las sustancias hidratadas de la pasta de cemento, CSH o la tobermorita [15].

## Conclusiones

Las placas de hormigón de la Ruta Nacional N° 20 (tramo autopista Córdoba – Villa Carlos Paz) presentan fisuramiento y desarrollo de silicatos de calcio con cantidades variables de sodio, potasio, aluminio y azufre en fisuras, cavidades de aire accidental y en la zona de interfase pasta-agregado como consecuencia de la RAS.

La presencia de ettringita secundaria en fisuras y como relleno de cavidades no está vinculada a un proceso de ataque por sulfatos sino a un proceso normal de envejecimiento del hormigón, acelerado por el deterioro de las placas debido a problemas de humedad y al desarrollo de la RAS.

Los agregados gnéisicos y graníticos con cuarzo tensionado reaccionaron con los álcalis y el calcio de la solución de poro del hormigón para producir silicatos de neoformación como la fase similar a la tobermorita



identificada por DRX, que rellenan las cavidades de aire, fisuras y/o se disponen en la interfase pasta-agregado.

En algunos sectores de la autopista el pavimento flexible refleja el avance de los procesos de deterioro de las placas de hormigón subyacentes evidenciado por el fisuramiento y escalonamiento de la carpeta asfáltica en la zona de juntas.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba, a la Universidad Nacional de Córdoba, a la Universidad Nacional del Sur, al CONICET y a la CIC de la provincia de Buenos Aires.

### Referencias

- [1] P.J. Maiza, S.A. Marfil y C.A. Milanesi: *Desarrollo de minerales de neoformación en un pavimento deteriorado por la reacción álcali-sílice*. Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía Vol. 21-A (1998), 156-157.
- [2] P.J. Maiza, S.A. Marfil y C.A. Milanesi: *Minerales desarrollados en hormigones deteriorados por la reacción álcali-sílice (Provincia de Córdoba)*. VII Jornadas Pampeanas de Ciencias Naturales. COPROCNA (1999), 193-199.
- [3] M.-A. Bérubé et B. Fourier: *Les produits de la réaction alcalis-silice dans le béton: étude de cas de la région de Québec*. Canadian Mineralogist 24 (1986), 271-288.
- [4] G. Davies and R.E. Oberholster: *Chemical and swell properties of the alkali-silica reaction product*. 8th Int. Congress on the Chemistry of Cement Vol. V, Rio de Janeiro, Brasil (1986a), 249-255.
- [5] G. Davies and R.E. Oberholster: *The alkali-silica reaction product: A mineralogical and electron microscopic study*. 8th Int. Conf. Cem. Mic., Orlando, Florida (1986b), 303-326.
- [6] V. Jensen: *Alkali Aggregate Reaction in Southern Norway*. Doctor Technicae Thesis. The Norwegian Institute of Technology, University of Trondheim, Norway (1993).
- [7] C. Milanesi, C.E. Souza, S. Marfil y P. Maiza. Estudio de las manifestaciones de RAS detectadas en el pavimento de hormigón de la ruta nacional N° 127 y su relación con el deterioro de la obra. III Congreso Internacional. 17ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Memorias, Córdoba, (2008), 273-280.
- [8] K. Scrivener and J.P. Skalny (Eds): *Conclusions of the International RILEM TC 186-ISA Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation (4-6 September 2002, Villars, Switzerland)*. Materials and Structures 38 (2005), 659-663.
- [9] W.F. Cole and C.J. Lancucki: *Products formed in an aged concrete. The occurrence of okenite*. Cement and Concrete Research 13 (1983), 611- 618.





- [10] W.F. Cole, C.J. Lancucki and M.J. Sandy: *Products formed in an aged concrete*. Cement and Concrete Research II (1981), 443-454.
- [11] L. De Ceukelaire: *The determination of the most common crystalline alkali-silica reaction product*. Materials and Structures 24 (1991), 169-171.
- [12] P. Maiza, S. Marfil and O. Batic: *Identification of zeolites in concretes affected by ASR. Effect of different aggregates*. 9th ICAAR, Westminster, London Vol. 2 (1993), 630-637.
- [13] S.A. Marfil and P.J. Maiza: *Deteriorated pavements due to the alkali-silica reaction. A petrographic study of three cases in Argentina*. Cement and Concrete Research 31 (2001) 1017-1021.
- [14] K. Peterson, D. Gress, T. Van Dam, L. Sutter: *Crystallized alkali-silica gel in concrete from the late 1890s*. Cement and Concrete Research 36 (2006), 1523-1532.
- [15] M. Regourd-Moranville: *Products of reaction and petrographic examination*. In: Okada K, Nishibayashi S, Kawamura M, (Eds). 8<sup>th</sup> ICAAR, Kyoto (1989) 445-456.